

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108223

外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统*

殷晓康, 杨丽强, 王伟, 古卓永, 李伟

(中国石油大学(华东)机电工程学院 青岛 266580)

摘要:本文提出带集中式绕组可方便开合的新型探头设计,实现基于旋转电磁场涡流原理的管件外检测。通过COMSOL有限元模型研究了集中式绕组产生的旋转磁场特征及接收线圈参数对检测效果的影响,仿真结果表明集中式绕组可产生适于管件外壁缺陷检测的旋转电磁场,匝数较多、紧贴管道外壁并位于激励线圈端部的圆形线圈可更好地实现畸变信号拾取。构建了外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统,实现了对0.5 mm宽的周向与轴向裂纹检测,测试了系统对不同深度裂纹的识别能力,并利用位于管道外壁0到90°不同位置的裂纹验证了检测系统对裂纹周向定位能力,结果表明研发系统可进行任意方向裂纹的检测和周向定位,为连续管等管状构件的外检测提供一种新的方法。

关键词: 旋转电磁场; 涡流; 金属管; 外穿探头; 集中绕组

中图分类号: TH878 TM154 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Encircling rotating field eddy current non-destructive evaluation system with concentrated excitation windings

Yin Xiaokang, Yang Liqiang, Wang Wei, Gu Zhuoyong, Li Wei

(School of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: This article proposes a new probe design with concentrated windings that can be easily opened and closed. The external inspection of pipes is realized, which is based on the principle of rotating electromagnetic field eddy current. Through the finite element (FE) model constructed in COMSOL, the characteristics of the rotating magnetic field generated by the concentrated winding and the influence of various parameters of the receiving coil on the detection effect are studied. Simulation results show that the concentrated winding can generate a rotating electromagnetic field that can be used to achieve defect detection on the outer wall of the pipeline. The pick-up of the distorted signal can be realized in a better way by utilizing the circular coil which has many turns and is close to the outer wall of the pipe and at the end of the excitation coil. An encircling rotating field eddy current (RoFEC) non-destructive evaluation system with concentrated excitation windings is established to achieve the detection of 0.5 mm wide circumferential and axial cracks. The ability of the system for identifying cracks at different depths is tested. Cracks located at different positions on the outer wall of the pipeline from 0 to 90° are used to verify the ability of the detection system to determine the circumferential location of the defect. Results show that the developed system can detect crack of arbitrary direction and locate its circumferential location, which provides a new approach for the external detection of tubular components such as coiled tubes.

Keywords: rotating field; eddy current; metal tube; encircling probe; concentrated windings

0 引言

金属管作为典型的构件,已广泛应用于石油、燃气、化工、航空航天、机械等诸多行业。金属管在服役过程

中,极易出现变形、腐蚀、裂纹甚至开裂等缺陷,导致结构失效、输送介质泄漏等,可能造成严重的经济损失并严重危及人的生命[1]。因此,开展对金属管的无损检测技术研究,实现对其完整性的评价,具有重要的意义[2]。针对于金属管缺陷的检测,国内外已经进行了大量的研

收稿日期:2021-07-10 Received Date: 2021-07-10

* 基金项目:国家自然科学基金(52075536,51675536)、中石油重大科技项目(ZD2019183004)资助

究。而涡流相关检测^[3-7]、漏磁检测^[8]、交流电磁场测量 (alternating current field measurement, ACFM)^[9]、超声导波检测^[10-11]及射线检测等技术,上述技术在金属检测得到了较为广阔的应用,但存在部分局限,例如:传统涡流仅能实现探头下方区域缺陷检测,要实现全周覆盖,需要进行周向与轴向扫查;漏磁、交流电磁场等检测技术对裂纹缺陷的方向较为敏感,需要进行交叉磁化检测;超声检测可检测管道内外缺陷、检测精度高、穿透力强、检测深度大,但是超声检测需要操作人员具备丰富的经验,且对被检表面清洁度要求高、难适用于粗糙及不规则表面等局限性;射线检测虽然穿透力强、管壁内部结构可清晰成像,但是射线检测的检测速度慢,而且过程复杂、会辐射损害他人健康。近年来,为克服上述检测方法在用于金属管检测时所遇到的原理或工艺上的局限,研究人员提出旋转电磁场涡流检测技术^[12],深入研究了平面旋转电磁场对板状结构的检测^[13-16]以及空间旋转电磁场对管道内的检测^[17],并在蒸汽管内检测领域进行了尝试^[18-19]。相关研究表明,旋转电磁场涡流检测技术用电旋转代替机械旋转,可实现对管壁的全覆盖,对各个方向的裂纹均敏感,对事件表面处理要求较低,实施方便且绿色环保,在用于金属管检测时相较于上述传统技术有其独有的优势。但截止目前,国内外相关研究侧重于旋转电磁场涡流检测机理研究及其在金属管内检测领域的应用,对外穿式旋转电磁场涡流检测的研究仅限于对探头的仿真^[20]。事实上,在油气及化工行业中,存在大量需对其外表面缺陷进行全面检测的金属管/柱(如连续油管、钻杆等),急需对旋转电磁场涡流检测技术在金属管外检测领域的应用及相应的外穿式旋转电磁场涡流检测探头设计进行深入研究。

本文在旋转电磁场涡流内检测技术的基础上,对外穿式旋转电磁场涡流无损检测方法进行了深入研究,设计了具有集中激励绕组与单一圆形拾取线圈的旋转电磁场涡流检测探头,利用三维有限元模型研究了探头设计参数对检测性能的影响,构建了外穿式旋转电磁场涡流无损检测系统并对钢管表面不同方向不同周向位置的裂纹缺陷进行了检测,验证了该方法的可行性。

1 外穿式旋转电磁场涡流检测技术

图 1 为外穿式旋转电磁场涡流检测探头的示意图,在金属管外有贴合在管外壁的分布式三相励磁绕组,在截面图中 AX、BY 以及 CZ 各为一相,每相绕组相距 120° 空间角度。驱动 3 个绕组的激励电流为振幅、相位和频率可调的交流电。为产生旋转电磁场,通过三相绕组的电流需满足以下关系:

$$i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t \quad (1)$$

$$i_B = \sqrt{2}I \cos \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) \quad (2)$$

$$i_C = \sqrt{2}I \cos \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right) \quad (3)$$

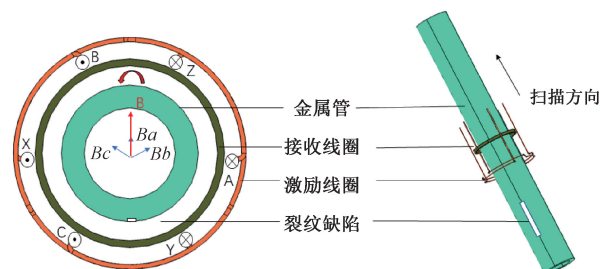


图 1 旋转电磁场涡流检测原理

Fig. 1 Schematic of rotating electromagnetic field eddy current (RoFEC) detection technique

在三相电流的激励下,3 个绕组 AX、BY 和 CZ 分别产生与之垂直的 3 个磁场分量。与三相异步电机原理类似,这 3 个分量可合成幅值恒定的旋转磁场。该旋转磁场可在金属管外壁激发沿圆周旋转的涡电流。若金属管外壁无缺陷,管体表面涡电流将仅产生沿管截面径向的二次场。若金属管外壁存在缺陷,除截面径向的二次场外,涡电流在缺陷的扰动下还将产生沿管截面轴向与管轴向的二次场。如能对涡电流产生的各磁场分量进行检测,可以对金属管外壁缺陷进行表征。

若采用如图 1 所示单一圆形线圈作为接收线圈,则缺陷产生的涡流扰动二次磁场的轴向分量会引起线圈电压值的变化。接收线圈中产生的感应电压可用公式表示为:

$$V = -N \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \mathbf{B}_\perp \cdot n dS = -N \frac{\partial}{\partial t} \oint A \cdot dl \quad (4)$$

其中, \mathbf{B}_\perp 为轴向磁场分量。圆形接收线圈的位置与方向决定了该线圈只对金属管轴向磁场的变化敏感,而磁场在管截面径向和切向上的分量对其感应电压的影响可忽略。因此,接收线圈的感应电压只在缺陷存在时产生。若被测金属管外壁无缺陷,管壁外将不会有轴向磁场分量产生,圆形接收线圈的感应电压接近为零。另外,接收线圈中感应电压的相位与管壁缺陷的周向位置有关。原因是主磁场围绕管壁进行旋转,缺陷与磁场相互作用产生轴向扰动磁场的时刻是旋转磁场与缺陷相遇的时刻,该时刻的先后将反映在接收线圈感应电压的相位上。可见,外穿式旋转电磁场涡流检测探头用探测场的电磁旋转代替探头的机械旋转扫查,可实现金属管周向表面的全覆盖,同时可根据圆形接收线圈感应电压相位判断出缺陷的具体周向位置。

在部分检测工况下,金属管/柱为连续结构,不宜拆卸(如连续油管、在役管路等),图 1 所示具有贴合在金

属管外分布绕组的外穿式探头受其结构限制无法打开,难以实现金属管的注入与检测。为克服这一局限,本文提出基于集中式绕组的开合式探头,如图 2 所示。该种类型绕组的绕制和嵌装比较简单,且可以实现整体结构的开合,满足金属管的实时检测需求。集中式排列线圈激励模式所产生的旋转磁场与分布式排列线圈激励模型等效,且具有结构上的优势,适用于开合式探头的开发与应用。与图 1 中的探头相比除绕组形式不同外,图 2 中的外穿式旋转电磁场涡流探头具有 6 个集中式的绕组,相对绕组串联连接成一相(箭头为截面电流流向)。该结构与具有两对极的三相异步电动机的定子类似,旋转探测电磁场将具有两对磁极,其形状更为均匀,更有利于外穿式探头的缺陷检测。但需着重指出的是,在两对极的情况下,旋转磁场的旋转速度变为一对极情况下的一半。

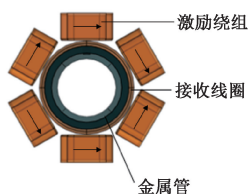


图 2 具有集中式绕组的外穿式旋转电磁场探头

Fig. 2 Encircling RoFEC probe with concentrated windings

本文提出的外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统技术采用电磁场旋转的方式代替探头本身的机械旋转,减少了探头与管壁之间的摩擦磨损,提高了检测速度;旋转探测场的分布规律与特性使得该技术可以检测管壁上各方向的缺陷,并且准确判断出缺陷的具体位置;探测场通过旋转覆盖整个管壁表面,可一次扫描可以检测出所有缺陷,大大提高了检测效率;集中式绕组开合式的探头设计可以增加探头使用的便捷性、实用性和可操作性,同时在检测过程中检测信号受管径影响较小,可以用同一个探头测量不同直径的金属管,提高了技术的现场适应性。

2 有限元仿真

本文采用 COMSOL 软件进行有限元仿真。COMSOL 为多物理场模拟计算及仿真提供了良好的平台,在多物理场的耦合方面有极强的优势,具有完全开放的构架,可任意定义函数和公式方程来进行求解。其建模方式灵活,具有可视化特性,可方便进行模型参数与物理属性的修改。尤其是 COMSOL 的 AC/DC 模块提供了求解使用磁矢势形式的 Maxwell 方程的磁场接口,可用来计算线圈、导体和磁铁内部和周围的磁场和感应电流分布,特别适合本文旋转电磁场检测技术的分析。

2.1 模型建立与特征信号提取

利用 COMSOL 软件,对带有圆形接收线圈的集中绕组外穿式探头以及被测金属管实体进行绘制。基于圆形接收线圈的外穿式探头有限元模型如图 3 和 4 所示。该仿真模型包括金属管、缺陷、圆形接收线圈、集中式排列激励线圈以及空气域。模型采用了 6 个激励绕组,从原理上讲,对于三相交流激励而言,3 个激励绕组即可产生旋转磁场。但对于本技术而言,与三相异步电动机类似,对于同样的用铜量,激励线圈个数越多,产生的旋转磁场极对数越多,偏离中心位置的旋转磁场强度越均匀,检测盲区也越小。但是,受限于加工工艺与绕组排布方式,绕组数量不可无限制增加。另外,对于同样的激励频率,增加激励绕组个数会导致旋转磁场的旋转速度也相应降低,使得涡电流强度降低,将降低涡电流对缺陷的灵敏度。综合考虑,兼顾检测效果、加工工艺、排布方式与有限元模型复杂度,选取 6 个激励绕组作为典型对所提出外穿式旋转电磁场涡流技术进行分析。Y 轴方向与金属管轴线方向一致,也是探头扫查方向;其法向为 X 轴方向,竖直方向为 Z 轴。模型部分参数见表 1~5。模型中使用了低碳钢、铜、空气 3 种材料,并将材料赋予实体模型,相关材料属性见表 6。对模型进行物理场设置,添加线圈几何分析,设置线圈匝数、电流频率大小及输入方向。该模型研究对象为材料为碳钢的金属管,为铁磁性材料,磁场难以穿透,故可设置阻抗边界条件,仅对金属管表面进行分析,以减少计算量,提高计算效率。

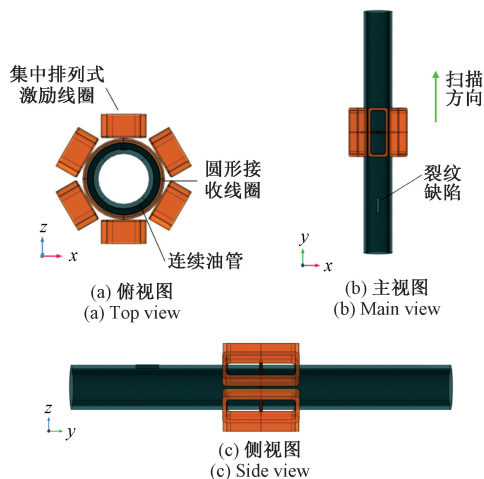


图 3 带有圆形接收线圈的外穿式探头模型

Fig. 3 The encircling probe model with the circular receiving coil

表 1 激励线圈的部分参数

Table 1 Some parameters of the excitation coil

长度/cm	宽度/cm	高度/cm	间距/cm	匝数/n	电导率/($S \cdot m^{-1}$)
10	4	2	11.6	500	6.00×10^7

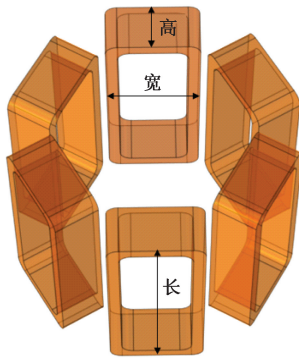


图 4 集中式激励绕组模型
Fig. 4 The model with concentrated windings

表 2 激励线圈的其他参数

Table 2 Other parameters of the excitation coil

电流大小/A	电流频率/kHz	导线截面积/m ²	材料类型
1	10	1.0×10 ⁻⁶	铜

表 3 接收线圈的参数

Table 3 Parameters of the receiver coil

内径/cm	外径/cm	厚度/cm	匝数/n	材料类型
9.6	10.0	0.2	500	铜

表 4 金属管参数

Table 4 Parameters of the metal pipe

外径/cm	壁厚/cm	长度/cm	材料类型
6	0.5	50	碳钢

表 5 缺陷参数

Table 5 Defect parameters

长/mm	宽/mm	深/mm
25.0	0.5	5.0

表 6 材料属性

Table 6 Material properties

模型元素	材料类型	相对磁导率	电导率/(S·m ⁻¹)	相对介电常数
金属管	碳钢	4 000	1.12×10 ⁷	1
线圈	铜	1	16.0×10 ⁷	1
空气域	空气	1	1	1
缺陷	空气	1	1	1

在仿真模型中对金属管进行参数化扫描,用缺陷的移动代替探头移动,在缺陷前后 20 cm 范围内进行扫描,以 0.5 cm 为步长。圆形接收线圈置于金属管和激励绕

组之间,沿图 3 所示 y 轴正方向看去电流方向为逆时针。图 5 为旋转电磁场激励下的金属管表面涡流示意图,当缺陷沿 y 方向进入环形涡流时,左半边的感应涡流从缺陷底部绕过,根据右手定则,该畸变涡流会产生沿 y 负方向的扰动磁场,再根据右手定则可以判断出此时圆形接受线圈的电压信号为正值,并在探头边缘位置达到峰值;当缺陷沿 y 轴正方向继续移动,此时感应涡流密度减小,因此相应的扰动信号强度会减小,感应电压值减小;当缺陷位于探头轴向意义上的正中间即 y=0 处时,环形感应涡流密度为零,因此电压值为零;缺陷继续沿 y 正向移动,经过右半边感应涡流时呈现和前半程对称的变化规律。

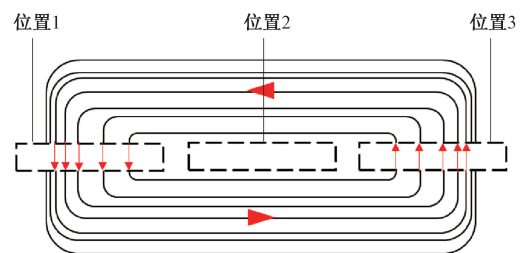
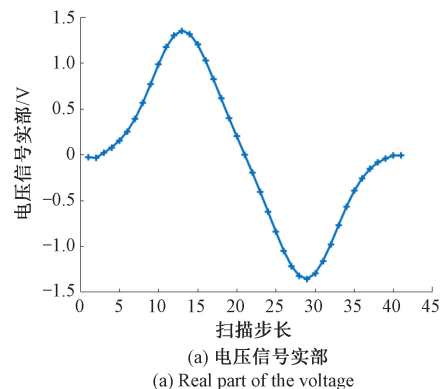


图 5 旋转磁场经过缺陷时涡流变化
Fig. 5 Eddy current changes when the rotating field across the defect

根据上述分析,缺陷在经过感应涡流区域时产生的畸变,在位置 1 处导致接受线圈感应电压信号到达峰值,在位置 2 处感应电压信号为零,在位置 3 处感应电压信号处于相反方向的峰值,这是因为此刻畸变涡流的绕向与位置 1 处相反,因此产生相反方向的扰动磁场。

图 6 为有限元仿真扫描结果,以接收线圈感应电压的实部与虚部形式呈现。

根据上述感应涡流的分布规律,涡流区域内各处的涡流密度不同,线圈外径处金属表面涡流密度最大,线圈中心处涡流密度为零。假设线圈外径为 R,则在 r<0.4R 范围内几乎没有涡流,涡流密度最大值在线圈外径附近一个狭窄区域内。



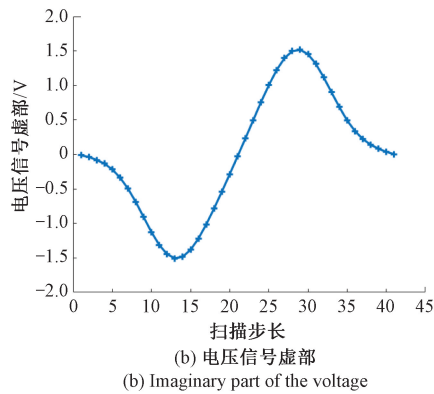


图 6 缺陷特征信号

Fig. 6 Characteristic signal of defect

为了更加深入地探究特征信号规律,通过对数据进行处理得到了电压信号的幅值和相位变化,如图 7 所示。通过分析电压信号的幅值变化可以发现,缺陷进出涡流区域时产生的电压幅值变化规律一致,两波峰对称。这是由于圆形接收线圈位于探头轴向意义上的正中间,因此对两端涡流扰动检测能力相同,如果圆形接收线圈在轴向发生偏移,感应电压幅值信号的两波峰将不再对称,这在后续的仿真研究中将进一步分析。

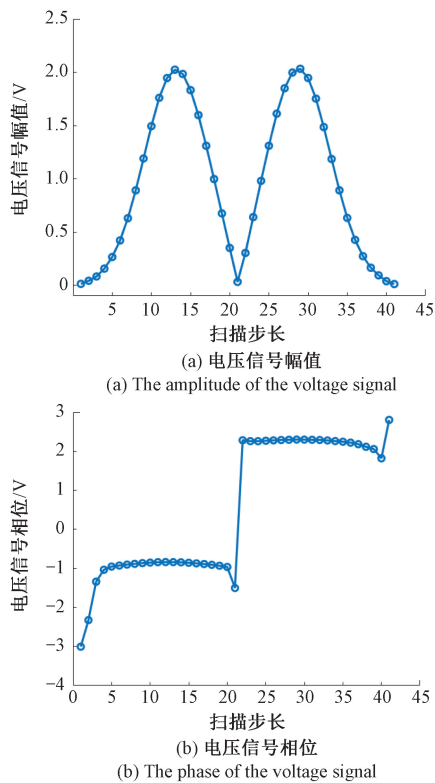


图 7 缺陷信号变化

Fig. 7 Defect signal change

2.2 外穿式旋转电磁场涡流检测系统影响因素研究

1) 接收线圈匝数对检测结果影响

接收线圈匝数决定着其灵敏度。对接收线圈匝数进行仿真研究,如图 8 所示,随着接收线圈匝数由 100 增加至 500,接收线圈的感应电压信号幅值逐渐增大,这说明接收线圈的匝数越多,其检测能力越强。因此,在对探头进行设计时,应在满足装配需求的基础上尽量增加接收线圈的匝数,以提高其检测能力。

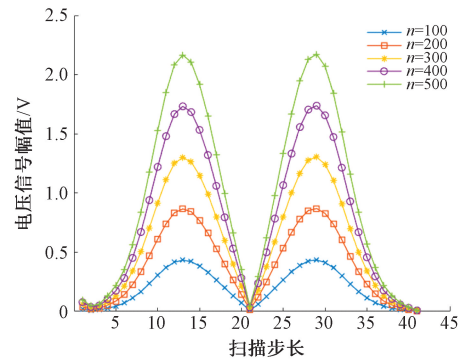


图 8 线圈匝数变化影响

Fig. 8 The influence of the number of turns of the coil change

2) 接收线圈半径对检测结果的影响

为研究接收线圈半径对探头检测结果的影响,从检测线圈位于激励线圈组内部和外部两种情况分别对接收线圈半径进行了参数化研究。如图 9 所示,从内部来看(接收线圈半径由 3.3 cm 增大到 3.7 cm),随接收线圈半径增大,接收线圈感应电压信号的幅值也增大;从外部来看,随着接收线圈半径的增大(从 6.7 cm 增大到 10.5 cm),接收线圈感应电压信号的幅值随之减小。在接收线圈半径略大于激励线圈组外径时,感应电压信号幅值达到最大,此时接收线圈紧贴于激励线圈绕组外径。仿真显示的规律与金属管壁附近的磁场强度分布规律相吻合,即距离激励线圈越近时磁场强度越大,相应的扰动磁场强度就会越大。

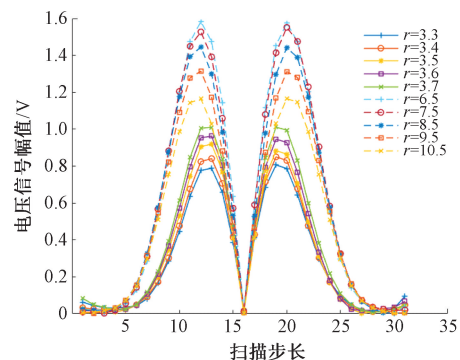


图 9 接收线圈半径变化影响

Fig. 9 The influence of receiving coil radius change

从以上分析可以得出,在对探头进行设计时,圆形接收线圈的半径存在最优值,应该将圆形接收线圈置于激励线圈组外部,并尽量与激励线圈组外边缘紧贴,以提高信号强度和减少线圈半径变化对检测信号相位的影响。

3) 被测金属管管径变化对检测结果影响

为考察被测金属管管径变化对检测结果的影响,对不同直径的金属管进行仿真研究。如图 10 所示,随着金属管半径由 3.0 cm 增大到 3.5 cm,接收线圈的感应电压信号幅值逐渐增大。这是因为金属管半径越大,金属管外壁会越靠近激励绕组,激励绕组在管道上产生的旋转磁场信号越强,从而使受到缺陷扰动产生的轴向磁场信号增强,进而导致接收线圈的感应电压信号的幅值增大。但是相比于平面涡流的提高变化对检测信号的影响,需着重指出的是,被测金属管管径的变化主要影响了激励线圈的提离距离。对于圆形接收线圈,由于被测金属管始终被其包围,且缺陷产生的扰动磁场主要分布在管壁附近区域,使得接收线圈对扰动磁场的检测受管径变化的影响较小,这也是使用单一线圈作为扰动磁场拾取装置这一检测方案的一个优点。

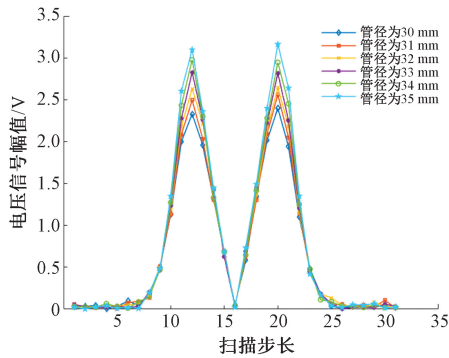


图 10 金属管直径变化影响

Fig. 10 The influence of metal pipe diameter change

4) 圆形接收线圈轴向位置对检测结果影响

圆形接收线圈在整个探头中的轴向位置也是探头设计中重要的一环,为此对圆形接收线圈在探头中轴向位置对检测结果的影响做了仿真研究,模型如图 11 所示。

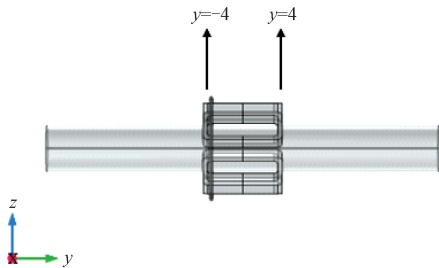
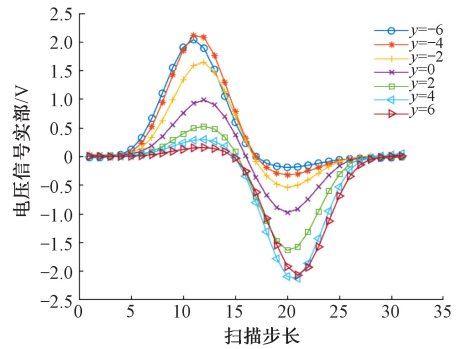


图 11 圆形接收线圈轴向位置示意图

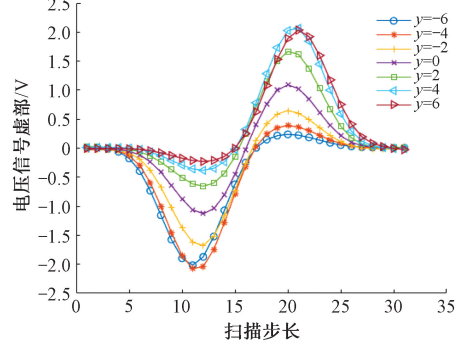
Fig. 11 Schematic diagram of the axial position of the circular receiving coil

当圆形接收线圈沿轴向位置移动时,感应电压实部与虚部的变化规律如图 12(a) 和 12(b) 所示。当圆形接收线圈位于 $y=-6$ 处时,此时距离激励绕组左端较近,主要接收缺陷进入时产生的扰动信号,距离激励绕组右端较远,只能接收小部分缺陷离开时产生的扰动信号,因此信号呈现“大波峰,小波谷”的趋势;随着接收线圈位置沿 y 轴方向偏移,接收线圈对于缺陷进入时产生的扰动信号的接收能力减小,对于缺陷离开时产生的扰动信号的接收能力增强,在 $y=0$ 处对缺陷进入时和离开时产生扰动信号的接受能力相同;当圆形接收线圈位于 $y=-6$ 处时,此时距离激励绕组右端较近,主要接收缺陷离开时



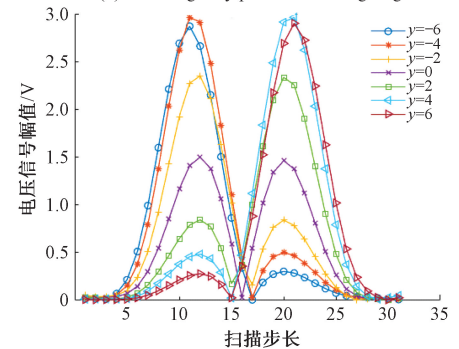
(a) 电压信号实部

(a) The real part of the voltage signal



(b) 电压信号虚部

(b) The imaginary part of the voltage signal



(c) 电压幅值

(c) Voltage amplitude

图 12 圆形接收线圈轴向位置影响研究

Fig. 12 Research on influence of axial position of the circular receiver coil

产生的扰动信号,距离激励绕组左端较远,只能接收小部分缺陷进入时产生的扰动信号,因此信号呈现“小波峰,大波谷”的趋势。

将感应电压将缺陷特征信号进行进一步处理可以得到电压幅值图,如图 12(c)。当圆形接收线圈位于探头一端时,电压信号幅值最大,即信号强度最大。综上,在后续的探头设计中,为了提高信号强度,可以将接收线圈置于探头一端。

5) 缺陷周向位置对检测结果影响

改变裂纹在周向的相对位置,使其相对参考点(顶端绕组中心点)的角度分别为 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°和 315°,获取缺陷仿真扫描结果如图 13 所示。通过分析图 13(a)和(b)可以发现,同一尺寸的缺陷在不同周向角度产生的电压扰动信号幅值近似,而相位有明显的不同。将感应电压信号的实部和虚部绘制在阻抗平面中,得到感应电压的阻抗平面图,如图 13(c)所示。由于感应电压相位的不同,阻抗信号图中不同角度缺陷的曲线偏转的角度与金属管模型中裂纹缺陷的角度分布相一致。可见,依靠相位分析或阻抗平面图,本文所提出的带有集中激励绕组与单个圆形接收线圈的探头可以对不同周向位置的裂纹缺陷进行精准定位。

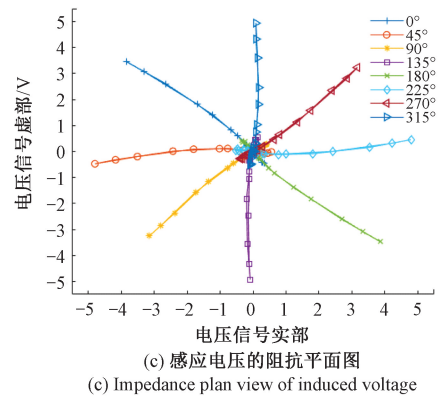
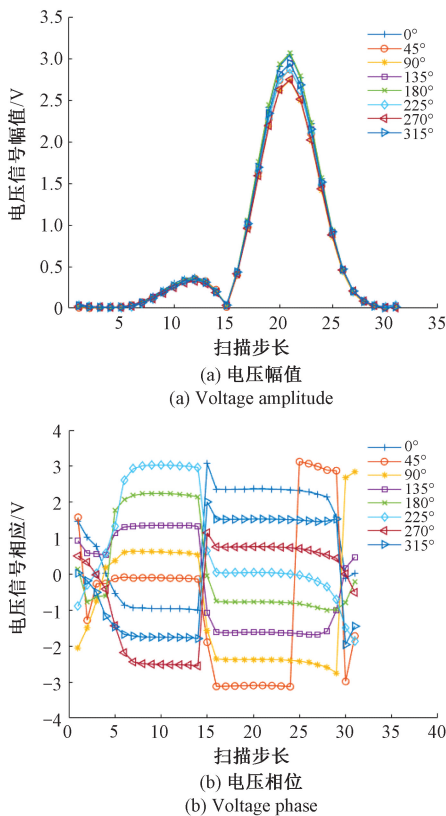


图 13 圆形接收线圈位于一端时缺陷角度研究
Fig. 13 Research on the defect angle with the circular receiving coil at the edge

3 外穿式旋转电磁场检测试验

3.1 检测系统设计

根据金属管的检测需求,进行外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统的设计,检测系统原理示意如图 14 所示。该系统主要包括检测探头、对中装置、信号源、移相电路、电压放大器、锁相放大器、采集卡和计算机等。信号源为正弦交流信号,通过移相电路得到相位差为 120°的三相电压激励信号,输入到激励线圈绕组中,在金属管表面感应出沿管外壁旋转的环形涡流,当缺陷引起环形涡流扰动时,空间磁场会发生畸变,接收线圈拾取磁场信号并转化为感应电压信号,经过电压放大器和锁相放大器对信号进行调理,由采集卡采集并传输到计算机,再通过信号处理软件分析显示结果。

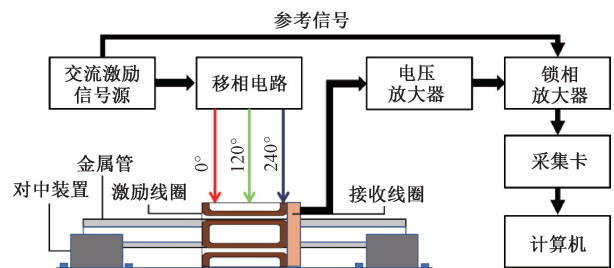


图 14 检测系统设计原理
Fig. 14 Schematic of the design principle of the detection system

以有限元仿真结论为依据,结合对于金属管外壁缺陷检测需求的综合考量,对检测探头及其辅助装置进行设计。主要包括带有圆形接收线圈的外穿式探头设计以及简易对中装置的设计。

由于外穿式集中绕组激励旋转电磁场与交流异步电

动机旋转磁场激励原理基本相似,集中式绕组设计方面也参考电机定子结构。带有圆形接收线圈的外穿式探头主要包括激励部分和接收部分,激励部分主要由激励绕组骨架、上绕线装置、下绕线装置构成。上绕线装置和下绕线装置主要用于三相激励绕组的合理分布和定位,以及便于拆卸以供后续用于改变接线方式后探头工作效果的研究。接收部分主要由至于探头一端的圆形接收线圈骨架构成,骨架表面开有凹槽,以便于接收线圈的绕制,如图 15 所示。

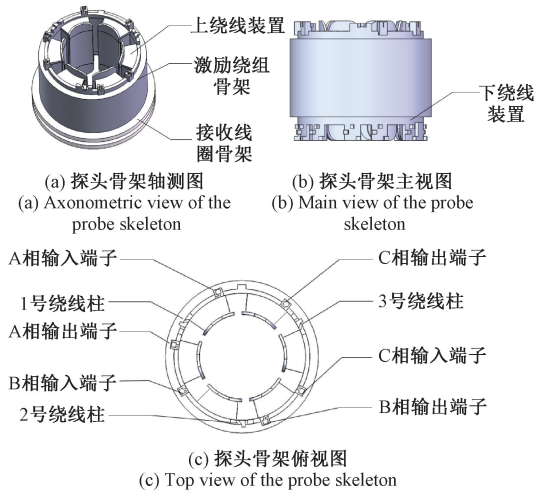


图 15 带圆形接收线圈的外穿式探头结构
Fig. 15 The structure of the encircling probe with the circular receiving coil

探头主体部分材料主要使用 8200 树脂材料加工制造而成,强度较高。线圈部分由 1 mm 漆包铜线绕制而成,每相绕组的线圈匝数为 50 匝。最后制作而成的探头激励部分如图 16 所示。

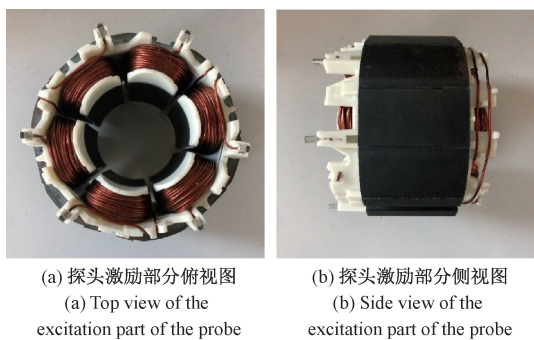


图 16 探头实物图
Fig. 16 Photos of the probe

为减小被测金属管对中度变化对检测结果的影响,使被测金属管轴线与探头轴线始终重合于一条直线,本文进行了简易对中装置的设计,如图 17 所示。

该简易对中装置的工作原理是将带有螺纹孔的 V 形

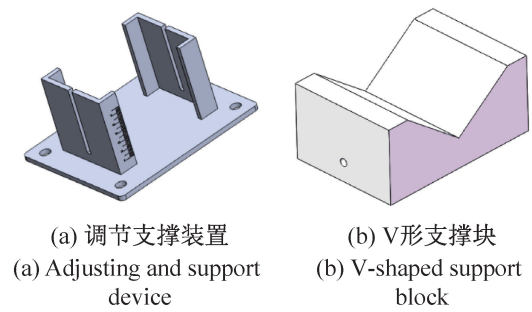


图 17 检测系统对中装置
Fig. 17 Detection system centering device

支撑块安装于调节支撑装置内,两个尺寸相同、调节高度相同的调节支撑装置安装于滑轨两端。调节支撑装置的底座设计有通孔,以供安装固定使用。调节支撑装置的外部设计有刻度,这样可以便于实现精确对中需求。两边选定试验中所需的合适高度后,将 V 形支撑块通过紧固螺钉固定于调节支撑装置内。调节支撑装置的两端开有窄槽,可以实现紧固螺钉的自由移动。该简易对中装置的优点是构造简单成本低,操作简便,可实现较为精确的对中效果。

3.2 缺陷检测试验与结果分析

利用所构建外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统,对金属管试件进行检测试验。整个试验系统包括信号发生器、移相电路、对中装置、探头、电压放大器、锁相放大器、采集卡、计算机等模块,如图 18 所示。通过推动探头对金属管试件进行扫查,将接收线圈测得的模拟信号传输到采集卡中进行处理,后传输至计算机进行分析和显示。

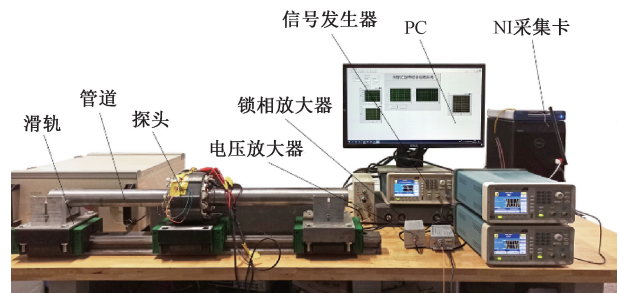


图 18 旋转电磁场无损检测系统试验平台
Fig. 18 Rotating electromagnetic field non-destructive testing system test platform

1) 纵横裂纹缺陷的检测能力对比

本试验中所用的试件为两段长 520 mm、外径为 50 mm、壁厚 10 mm 的金属管,材料为 45 号钢,管体表面各有一条纵向裂纹和横向裂纹缺陷,试件实物如图 19 所示,其中裂纹尺寸如表 7 所示。

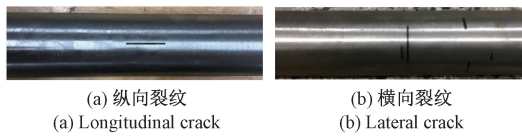


图 19 金属管试件实物

Fig. 19 The physical object of the metal tube test piece

表 7 裂纹缺陷尺寸

Table 7 Crack defect size mm

裂纹种类	长	宽	深
纵向裂纹	25.0	0.5	5.0
横向裂纹	25.0	0.5	5.0

利用所研发系统对该试件进行检测,将信号发生器产生的信号设置为幅值 5 V,频率为 10 kHz。将探头固定在试验台上,将被测试块固定在对中装置上,然后由推动探头对带有纵向裂纹缺陷和横向裂纹缺陷的试件分别进行匀速扫查。圆形接收线圈拾取缺陷产生的扰动磁场信号的轴向分量(轴向分量占到该扰动信号的大部分),通过信号处理及采集环节,在计算机软件中绘制出波形图。

为方便对比,数据结果进行了归一化处理。纵向裂纹和横向裂纹的缺陷检测结果对比如图 20 所示,从电压信号幅值来看,该探头对于纵向裂纹的检测能力远大于横向裂纹。这是由于纵向裂纹引起的横向涡流扰动远大于横向裂纹引起的横向涡流扰动,因此纵向裂纹产生的轴向扰动磁场相对较大,导致接收线圈的电压信号更强。这说明该系统的局限性在于虽然对纵向裂纹和横向裂纹都能进行检出,但对于横向裂纹缺陷的检测能力相对较弱。

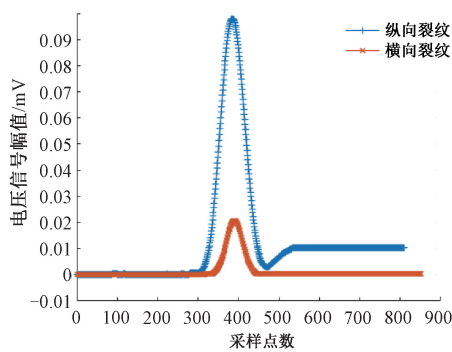


图 20 横纵裂纹缺陷检测信号对比

Fig. 20 Comparison of voltage signals of transverse and longitudinal cracks

2) 不同深度裂纹缺陷检测

利用所研发检测系统对带有不同深度裂纹的金属管进行检测。所检测金属管的尺寸图和实物图分别如

图 21(a) 和 21(b) 所示。金属管长 520 mm,外径为 50.0 mm,壁厚 10.0 mm,材料为 45 号钢,管体表面的缺陷为 3 条深度不同的纵向裂纹缺陷。

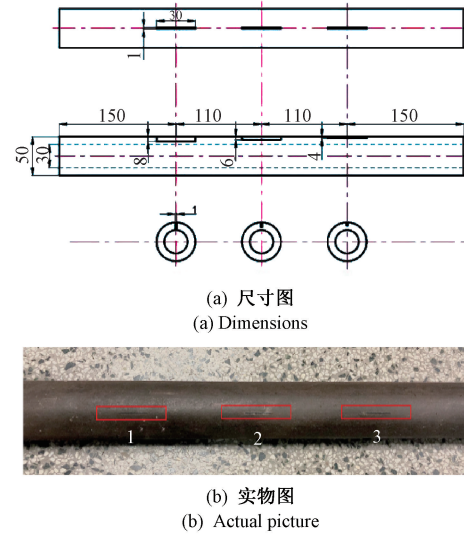
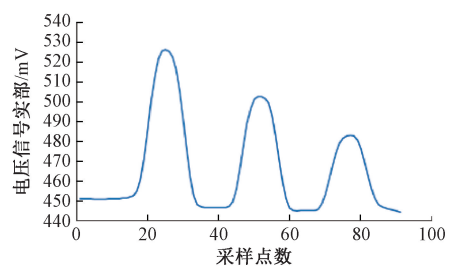


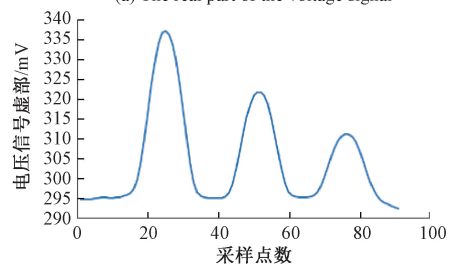
图 21 带不同深度裂纹的金属管试件

Fig. 21 Specimens with different defects at different depths

检测结果如图 22 所示,探头一次性扫过 3 个深度依次减小的纵向裂纹,从检测线圈拾取的电压实部和虚部信号曲线可知,每经过一个缺陷,感应电压信号会产生一个明显的波峰。缺陷的深度越小,信号波峰的幅值就越小,意味着深度较大的纵向裂纹缺陷所产生的扰动电压信号较强。将检测电压信号的实部和虚部绘制在阻抗平面图中,如图 22(c) 所示,3 个裂纹缺陷产生的特征曲线包围的面积不同,但偏转方向基本一致。可见,阻抗平面图的特征曲线可反映裂纹的尺寸与周向位置。



(a) The real part of the voltage signal



(b) The imaginary part of the voltage signal

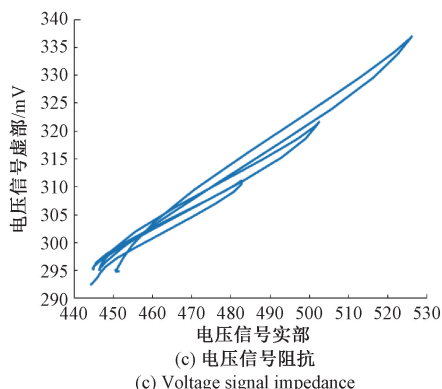


图 22 深度不同缺陷特征信号

Fig. 22 Characteristic signals of different defects at different depths

3) 表面裂纹缺陷周向定位能力检测试

为验证所研发系统对金属管外壁缺陷的周向定位能力,对 $0^\circ \sim 90^\circ$ 周向分布范围内的裂纹缺陷进行了检测(裂纹在管外壁周向相对参考位置的角度分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90°),最终得到了如图 23 所示的试验结果。由于缺陷相对激励线圈的位置不同,同一缺陷位于不同周向位置时导致圆形线圈拾取的感应电压信号的实部与虚部对呈现不同的曲线,如图 23(a)和(b)所示(对数据进行归一化处理)。实部信号和虚部信号是经过锁相后出的两路信号,所绘制的实部和虚部信号

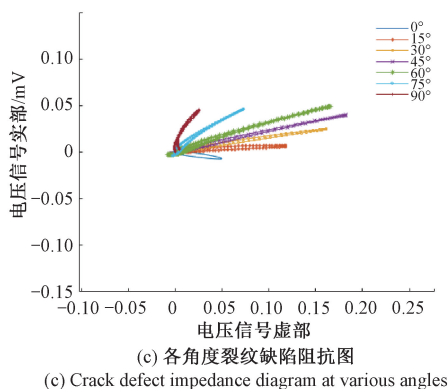
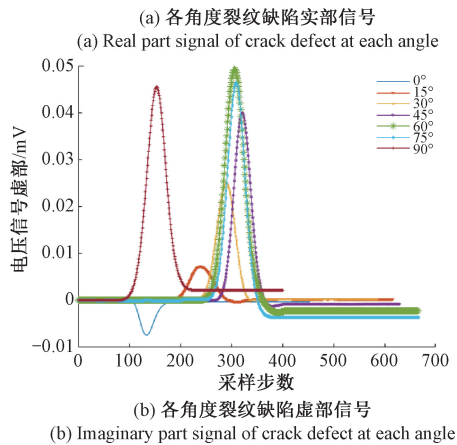
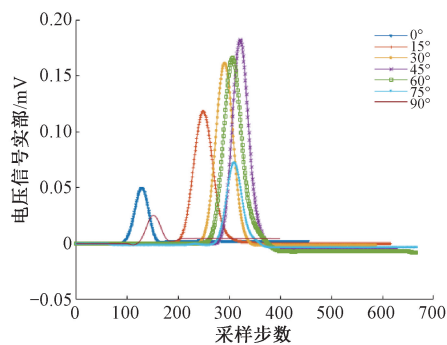


图 23 角度不同缺陷特征信号

Fig. 23 Characteristic signals of defects with different angles

本身包含了检测线圈感应电压幅值与角度的综合影响,具体表现为在单一的实部/虚部信号中,畸变的大小/方向与其出现的时间均有变化,导致实部信号图或虚部信号图的不同数据无法进行直观快速的比较,需通过综合处理实部信号和虚部信号的相应数据得到相应数据的阻抗曲线。将实部与虚部绘制在阻抗平面图中,可得到阻抗平面中的特征曲线,如图 23(c)所示。由每个角度缺陷的特征曲线可清晰的看出,特征曲线的偏转角度反映了缺陷的周向位置,表面检测系统可以有效检出缺陷的角度变化,但每条特征曲线包围的面积有所变化,在后续量化研究时,需要根据角度信息获取补偿系数。



4 结 论

针对现有金属管外壁缺陷无损检测技术的实际需求与现有研究的局限,本文提出带集中式绕组可方便开合的新型探头设计,实现基于旋转电磁场涡流原理的管件外检测。所提出的外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测技术克服常规超声需要复杂表面处理与耦合、常规磁粉与 ACFM 技术需要交叉磁化、常规涡流检测技术需要周向扫查且提高敏感、射线技术带来效率与职业安全问题等固有局限,有望丰富电磁无损检测领域研究内涵,为金属管缺陷高效、高精全面检测提供一种行之有效的实用方法。本文通过有限元分析研究了接收线圈各项参数对检测效果的影响,并构建了检测系统,对位于钢管外壁的不同方向、不同尺寸、不同位置的裂纹进行了检测试验。主要结论如下:

1) 集中绕组的设计使得探头在检测现场便于开合,更适应金属管外壁缺陷检测实际需求。有限元仿真结果表明,外穿式集中绕组可以产生一个可以匀速旋转的均匀电磁场,该电磁场在连续油管表面感应出环形涡流,位于金属管表面的任意缺陷都能使这个环形涡流产生畸

变,进而产生扰动电磁场。

2)单一圆形线圈可作为畸变拾取装置,有效检出各方向裂纹缺陷并对其实现周向定位。有限元仿真结果表明,匝数较多、紧贴被测管道外壁并位于激励绕组端部的线圈可更好的检测效果。

3)所构建的外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统可对周向和轴向裂纹进行有效检测,阻抗平面图中特征曲线可反映缺陷的深度及其在管外壁周向位置,通过后续量化与补偿方法的研究有望实现缺陷的高精度量化与定位。

参考文献

- [1] 张超,李勇,闫贝,等. 金属套管腐蚀缺陷的脉冲涡流近-远场复合检测[J]. 无损检测, 2019, 41(10): 37-43.
ZHANG CH, LI Y, YAN B, et al. Evaluation of corrosion in double-casing pipes via near-and remote-field pulsed eddy current hybrid testing[J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(10): 37-43.
- [2] 徐志远,肖奇. 基于脉冲远场涡流的管道缺陷外检测与定量评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 80-87.
XU ZH Y, XIAO Q. Outside inspection and quantitative evaluation of pipe defects based on pulsed remote field eddy currents[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2): 80-87.
- [3] 周德强,潘萌,常祥,等. 铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测模式研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1498-1505.
ZHOU D Q, PAN M, CHANG X, et al. Research on detection modes of ferromagnetic component defects using pulsed eddy current[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1498-1505.
- [4] 徐志远,林章鹏,袁湘民,等. 管道弯头缺陷检测外置式远场涡流探头设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1119-1125.
XU ZH Y, LIN ZH P, YUAN X M, et al. External remote field eddy current probe for defect detection at pipe elbows [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1119-1125.
- [5] 杨庆宁,解社娟,何琨,等. 一种新型环向偏心涡流探头及其在小径管缺陷检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 109-117.
YANG Q N, XIE SH J, HE K, et al. A Novel circumferential eccentric eddy current probe and its application in defect detection of small-diameter tubes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 109-117.
- [6] 杨理践,郑文学,高松巍,等. 基于平衡电磁技术的钢板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 196-203.
YANG L J, ZHENG W X, GAO S W, et al. Steel plate crack defect detection method based on balanced electromagnetic technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 196-203.
- [7] 马烜,邹金慧. 铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 137-144.
MA H, ZOU J H. Pulsed eddy current infrared thermal imaging detection of internal defects of iron components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(7): 137-144.
- [8] 焦敬品,常予,李光海,等. 铁磁构件内外表面裂纹低频漏磁检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1808-1817.
JIAO J P, CHANG Y, LI G H, et al. Study on low frequency AC magnetic flux leakage detection for internal and external cracks of ferromagnetic structures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1808-1817.
- [9] 袁新安,李伟,殷晓康,等. 基于 ACFM 的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 27-33.
YUAN X AN, LI W, YIN X K, et al. Visual reconstruction of irregular crack in austenitic stainless steel based on ACFM technique [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 27-33.
- [10] LIU T, PEI C, CAI R, et al. A flexible and noncontact guided-wave transducer based on coils-only EMAT for pipe inspection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314: 112213.
- [11] 李子明,何存富,刘增华,等. 管道周向导波检测技术研究进展及展望[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(5): 641-657.
LI Z M, HE C F, LIU Z H, et al. Research progress and prospects of circumferential guided waves inspection technique in pipes[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(5): 641-657.
- [12] XIN J, LEI N, UDPA L, et al. Nondestructive inspection using rotating magnetic field eddy-current probe [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1070-1073.
- [13] YE C, HUANG Y, UDPA L, et al. Differential sensor measurement with rotating current excitation for evaluating multilayer structures [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(3): 782-789.

- [14] YE C, UDPA L, UDPA S. Optimization and validation of rotating current excitation with GMR array sensors for riveted structures inspection [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1512.
- [15] XU Z, WANG X, DENG Y. Rotating focused field eddy-current sensing for arbitrary orientation defects detection in carbon steel[J]. Sensors, 2020, 20: 2345.
- [16] KOYAMA K, HOSHIKAWA H, SAKON T. Study on metal detection with electromagnetic induction probe utilizing rotating magnetic field [J]. Electrical Engineering in Japan, 2011, 177(4): 1-11.
- [17] XIN J, TARKLESON E, LEI N, et al. Novel rotating field probe for inspection of tubes [J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1430(1): 358-365.
- [18] YE C, HUANG Y, UDPA L, et al. Novel rotating current probe with GMR array sensors for steam generate tube inspection [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12): 4995-5002.
- [19] XIN J J, LEI N G, UDPA L, et al. Rotating field eddy current probe with bobbin pickup coil for steam generator tubes inspection[J]. Ndt & E International, 2013, 54: 45-55.
- [20] 韩宁, 张志杰, 尹武良. 旋转磁场阵列式传感器设计及管道缺陷的仿真研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2019, (12): 17-22.
- HAN N, ZHANG ZH J, YIN W L. Design of rotating magnetic field array sensor and simulation of pipeline defects [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(12): 17-22.

作者简介



殷晓康(通信作者),2005年于华东理工大学获得学士学位,2007年于英国华威大学获得硕士学位,2011年于英国华威大学获得博士学位,现为中国石油大学(华东)教授,主要研究方向为电磁无损检测技术与结构健康监测技术。

E-mail: xiaokang.yin@upc.edu.cn

Yin Xiaokang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from East China University of Science and Technology in 2005, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from The University of Warwick in 2007 and 2011, respectively. He is currently a professor at China University of Petroleum (East China). His main research interests include electromagnetic NDE and SHM techniques.